



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 198 39 987 A 1**  
 $\triangle 98P8601$

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 R 33/385**  
H 01 F 7/20

⑲ Aktenzeichen: 198 39 987.1  
⑳ Anmeldetag: 2. 9. 1998  
㉓ Offenlegungstag: 9. 3. 2000

DE 198 39 987 A 1

⑦① Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦② Erfinder:  
Arz, Winfried, Dipl.-Ing. (FH), 90762 Fürth, DE;  
Stocker, Stefan, Dipl.-Ing. (FH), 90762 Fürth, DE

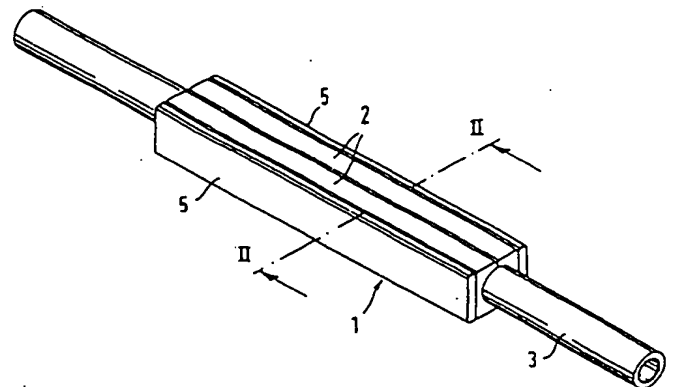
⑤⑤ Entgegenhaltungen:  
DE 34 45 448 A1  
DE 25 44 275 A1  
US 50 68 491  
EP 08 96 228 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Direktgekühlte Magnetspule, insbesondere Gradientenspule

⑤⑦ Direktgekühlte Magnetspule, insbesondere Gradientenspule für Magnetresonanzgeräte, bei der die Leiter für die Wicklungen mit einem inneren Kühlkanal zum Durchleiten einer Kühlflüssigkeit versehen sind, wobei die Leiter als Profilsegmentleiter (1, 1') ausgebildet sind, deren einzelne Profilsegmente (2, 2') ein Kühlrohr (3, 3') aus elektrisch nicht oder nur gering leitfähigem Werkstoff, insbesondere aus einem flexiblen Kunststoff, umschließen.



DE 198 39 987 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine direktgekühlte Magnetspule, insbesondere Gradientenspule für Magnetresonanzgeräte, bei der die Leiter für die Wicklungen mit einem inneren Kühlkanal zum Durchleiten einer Kühlflüssigkeit versehen sind.

Um die maximal zulässige Temperatur der Gradientenspule zu gewährleisten, ist es notwendig, die anfallenden elektrischen Verlustleistungen in Form von Wärme gezielt und effektiv abzuführen. Wenn man dabei berücksichtigt, daß es sich um Verlustleistungen in der Größenordnung mehr als 20 kW handeln kann, ergeben sich daraus erhebliche Anforderungen an die Kühlung. Neben indirektgekühlten Gradientenspulen, bei denen die Leiterwicklungsschichten konzentrisch umgebende Kühlrohrschichten vorgesehen sind, was aber weniger effektiv ist durch den Temperaturanstieg in aufbaubedingten Isolationsschichten zwischen den Lagen, sind dabei auch bereits direktgekühlte Magnetspulen der eingangs genannten Art vorgeschlagen und verwendet worden, bei denen durch die Anordnung eines inneren Kühlkanals in den elektrischen Leitern eine unmittelbare direkte Wärmeabfuhr quasi am Ort der Entstehung dieser Wärme stattfinden kann.

Das Vorsehen eines Kühlkanals im elektrischen Leiter für die Wicklungen der Gradientenspule bedingt wegen der hohen und teilweise unterschiedlichen Spannungen im Bereich der Gradientenspule eine vollständige Isolierung des Kühlmittelkreislaufs und, bei Verwendung von Wasser als Kühlmittel, die Verwendung von hochdestilliertem nichtleitendem Wasser, was den Betrieb doch außerordentlich verkompliziert und verteuert. Bei den hohen Spannungen und dem direkten Kontakt zwischen dem Wasser und den metallischen Leitern ergibt sich bereits nach relativ kurzer Zeit wiederum eine ionische Verunreinigung und damit eine Leitfähigkeit des Wassers, die wegen der Gefahr von Hochspannungsüberschlägen unbedingt vermieden werden sollte.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine direktgekühlte Magnetspule der eingangs genannten Art so auszugestalten, daß ein einfacher Betrieb unter Verwendung von nichtaufbereitetem Wasser möglich ist.

Zur Lösung dieser Aufgabe ist erfindungsgemäß vorgesehen, daß die Leiter als Profilsegmente ausgebildet sind, deren einzelne Profilsegmente ein Kühlrohr aus elektrisch nicht oder nur gering leitfähigem Werkstoff, insbesondere aus einem flexiblen Kunststoff, umschließen.

Durch die erfindungsgemäße Ausbildung ist die Kühlflüssigkeit vollständig von der Innenwandung des zu kühlenden elektrischen Leiters isoliert, so daß es auch überhaupt keine Rolle spielt, ob bei Verwendung von Wasser dieses Wasser durch natürliche Verunreinigungen eine mehr oder weniger große elektrische Leitfähigkeit besitzt. Auf der anderen Seite findet eine, durch die geringe Wandstärke der elektrisch isolierenden Kühlrohre nur wenig behinderte, quasi direkte Kühlung der Leiter der Spulenwicklungen durch die Kühlflüssigkeit statt, so daß eine sehr effektive Kühlung gegeben ist, die der Gefahr einer übermäßigen Erwärmung der Magnetspule entgegenwirkt. Durch den geringen Platzbedarf bei einem erfindungsgemäßen Aufbau einer Gradientenspule gegenüber bisherigen Varianten mit direkter Kühlung und hoher aufwendiger Außenisolierung bzw. indirekter Kühlung mit die Gradientenwicklungen umgebenden Kühlwicklungen, können die Gradientenspulenwicklungen radial extremer positioniert werden, was einen zusätzlichen Effektivitätsgewinn bei der Felderzeugung bewirkt. Der Wegfall von Wasserkonditionierungsmaßnahmen zur Absenkung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und zur Minimierung von Korrosionseffekten mit dem Leiterwerk-

stoff vereinfacht und verbilligt den Betrieb einer erfindungsgemäß aufgebauten direktgekühlten Magnetspule.

Der Aufbau der Leiter für eine erfindungsgemäße direktgekühlte Magnetspule kann in der Weise erfolgen, daß die Leitersegmente ineinander verdrehte Einzellitzen eines das Kühlrohr umhüllenden Litzenleiters sind, wobei die Herstellung eines solchen Leiters bevorzugt in der Weise erfolgen kann, daß das Kühlrohr mit den Einzellitzen umspinnen wird.

Als besonders vorteilhaft hat sich bei umfangreichen, der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Versuchen eine Konstruktion erwiesen, bei der die Profilsegmente Rechteckstangen mit querschnittlich halbkreisförmigen, das Kühlrohr formschlüssig umschließenden Rinnen sind. Ein solcher Aufbau läßt sich sehr einfach fertigen, wobei die querschnittlich rechteckförmigen Leiter auch der für hochbelastete Gradientenspulen üblichen, über Schablonen leicht verlegbaren Profilform entsprechen. Auf die Außenflächen der Profilsegmente können dabei weitere Einzeleiter, d. h. sowohl Massivleiter als auch Litzenleiter, zur Erhöhung der effektiven Leiterflächen aufgebracht sein.

Gemäß einer weiteren Variante der Ausgestaltung der Erfindung können am Kühlrohr die Leitersegmente zumindest teilweise halternd umgreifende Halterungsstege angeformt sein, beispielsweise derart, daß am Kühlrohr um 180° gegeneinander versetzte Längsstege angeformt sind, an denen wiederum beabstandete, beidseits überstehende Hakenquerstege angeformt sind. Diese letztere Ausführungsform ergibt ein flexibles Kunststoffbauteil, so daß das Biegen des fertigen Leiters – die eigentlichen beispielsweise aus Kupfer bestehenden Leitersegmente lassen sich ja sowieso gut formhaltend verbiegen – problemlos möglich ist.

In Weiterbildung der Erfindung kann dabei vorgesehen sein, daß am vorzugsweise querschnittlich rechteckförmigen Kühlrohr seitliche, jeweils ein Profilsegment formschlüssig aufnehmende Rohrprofile angeformt sind. Diese seitlichen Rohrprofile sollen dabei vorteilhafterweise querschnittlich rechteckförmig sein und eine glatte, rechteckförmige Außenkontur bilden. Gegebenenfalls können dabei parallel beabstandete Schlitzte in den die Außenkontur bildenden Wandungen der seitlichen Rohrprofile vorgesehen sein, um – ähnlich wie beim vorher beschriebenen Ausführungsbeispiel mit den beabstandeten Hakenquerstegen – ein einfacheres formhaltendes Verbiegen der fertigen Leiter zu ermöglichen.

Die Herstellung eines solchen Leiters mit in seitlichen Rohrprofilen des Kühlrohrs angeordneten Profilsegmenten des elektrischen Leiters kann sehr einfach über Coating- oder Extrusionsverfahren unter Verwendung thermoplastischer Kunststoffe erfolgen.

Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung einiger Ausführungsbeispiele sowie anhand der Zeichnung. Dabei zeigen:

Fig. 1 eine vereinfachte perspektivische Ansicht eines von zwei Leitersegmenten umschlossenen Kühlrohrs,

Fig. 2 einen vergrößerten Schnitt längs der Linie II-II in Fig. 1,

Fig. 3 eine perspektivische Ansicht eines aus zwei Leitern mit isoliertem Kühlkanal gemäß Fig. 1 aufgebauten Doppelleiters,

Fig. 4 einen vergrößerten Schnitt längs der Linie IV-IV in Fig. 3,

Fig. 5 eine abgewandelte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Segmentleiters mit die Leitersegmente halternd umgreifenden Hakenstegen,

Fig. 6 einen Schnitt längs der Linie VI-VI in Fig. 5,

Fig. 7 eine perspektivische Ansicht eines erfindungsge-

mäßen Leiters mit rechteckigem Kühlrohr und dieses umgebenden Rohrprofilen zur formschlüssigen Aufnahme der Profilsegmente des Leiters,

Fig. 8 einen Querschnitt längs der Linie VIII-VIII in Fig. 7, und

Fig. 9 eine Anordnung eines erfindungsgemäßen Leiters, bei dem das Kühlrohr von einem Litzenleiter umspunnen ist.

Bei dem Ausführungsbeispiel nach den Fig. 1 und 2 besteht der Profilsegmentleiter 1 aus zwei als Rechteckstangen ausgebildeten Profilsegmenten 2 mit querschnittlich halbkreisförmigen, ein beispielsweise aus Kunststoff bestehenden Kühlrohr 3 formschlüssig umschließenden Rinnen 4. Bei dem in den Fig. 1 und 2 gezeigten Ausführungsbeispiel, bei dem sich die beiden Profilsegmente gegeneinander bewegen können, so daß enge Krümmungsradien möglich sind, sind zusätzlich zu den beiden Profilsegmenten 2 noch zwei weitere Einzeileiter 5 vorgesehen, die auf die Außenflächen der Profilsegmente 2 zur Erhöhung der effektiven Leiterfläche aufgebracht sind. Diese zusätzlichen Einzeileiter 5 könnten dabei auch noch mit einer strukturierten Oberfläche oder beispielsweise als Litzenleiter ausgebildet sein.

Die Fig. 3 und 4 zeigen einen Doppelleiter aus zwei nebeneinander angeordneten, mit einem inneren Kühlrohr versehenen Leitern 1. Auf diese Art und Weise kann bei besonders dicken hochbelasteten Einzeileitern für Gradientenspulen ein einfacherer und effektiverer gekühlter Aufbau erfolgen, als wenn man einen entsprechend größeren Aufbau der Einzeileiteranordnung nach den Fig. 1 und 2 wählt. Die Verbindung mehrerer solcher Einzeileiter zu einem Bauelement wie in Fig. 2 und 3, ggf. auch unter Übereinanderanordnung solcher Doppelleiter nach den Fig. 2 und 3, ist herstellungstechnisch einfacher und ergibt eine noch effektivere Kühlung, da die Wege vom Entstehen der Wärme im Leiter zur Kühlflüssigkeit, im allgemeinen Wasser, im Kühlkanal 6 des Kühlrohrs geringer sind.

Der direktgekühlte Leiter gemäß Fig. 5 und 6 umfaßt ein Kühlrohr 3 mit um 180° versetzt gegeneinander angeformten Längsstege 7, an denen wiederum vertikal zur Mittelebene 8 der Längsstege verlaufende Hakenquerstege 9 angeformt sind, die mit ihren Haken 10 die Profilsegmente 2 umgreifen und damit halten. Eine besondere Verbindung der Teile miteinander, wie bei dem Ausführungsbeispiel nach den Fig. 1 bis 4, ist damit bei der Anordnung nach den Fig. 5 und 6 nicht erforderlich. Durch die Beabstandung der Hakenquerstege 9 ergibt sich eine Struktur, die sehr einfach verbiegbar ist, so daß die einfache formhaltende Verbiegbarkeit mit engen Biegeradien der metallischen Profilsegmente 2 auch für den gesamten direktgekühlten Leiter mit dem Kühlrohr und den angeformten Stegen noch gewährleistet ist.

Eine abgewandelte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen direktgekühlten Leiters mit einem inneren Kühlkanal 6 und einer Halterung der Profilsegmente 2' zeigen die Fig. 7 und 8. Dabei ist das im wesentlichen rechteckförmigen Kühlrohr 3' von vier gemeinsam mit dem Kühlrohr 3' eine glatte rechteckförmige, im dargestellten Ausführungsbeispiel quadratische Außenkontur bildende, seitlich anschließende Rohrprofile 11 umgeben, wobei diese Struktur mit den eingebetteten Profilsegmenten 2' über ein Extrusionsverfahren erhalten werden kann.

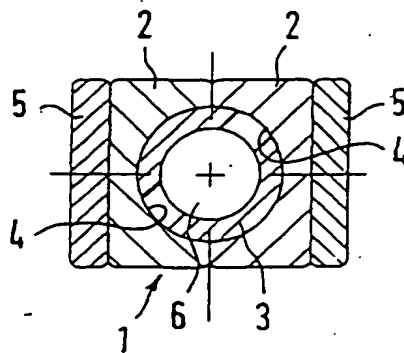
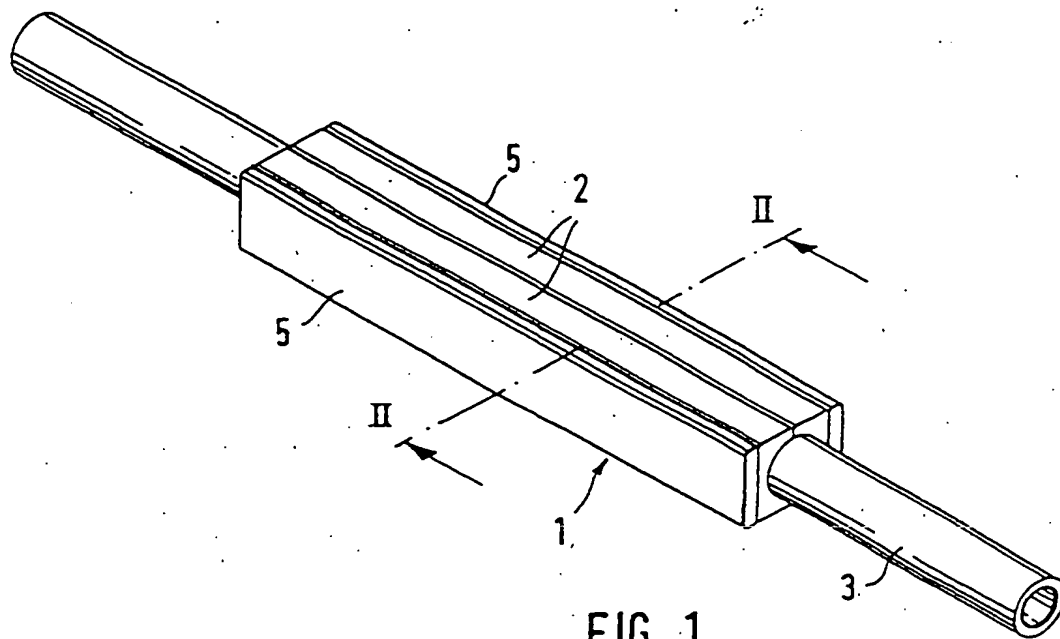
Die Fig. 9 zeigt schließlich im Querschnitt eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Leiters, bei dem das Kühlrohr 3 in einen Litzenleiter 12 eingebettet, vorzugsweise mit den Einzellitzen 13 des Litzenleiters 12 umspunnen ist. Diese Ausführungsform ist hinsichtlich des Wärmeübergangs von den äußeren Litzen zu der im Kühlkanal 6 laufenden Kühlflüssigkeit aber ungünstiger als die vorher gezeigten Varianten. Der Vorteil dieses Ausführungsbei-

spiels ist ein niedriger elektrischer Widerstand bei hohen Frequenzen durch Aufteilung in viele Einzelströme durch den Lichtleiter.

#### Patentansprüche

1. Direktgekühlte Magnetspule, insbesondere Gradientenspule für Magnetresonanzgeräte, bei der die Leiter für die Wicklungen mit einem inneren Kühlkanal zum Durchleiten einer Kühlflüssigkeit versehen sind, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Leiter als Profilsegmentleiter (1, 1') ausgebildet sind, deren einzelne Profilsegmente (2, 2') ein Kühlrohr (3, 3') aus elektrisch nicht oder nur gering leitfähigem Werkstoff, insbesondere aus einem flexiblen Kunststoff, umschließen.
2. Direktgekühlte Magnetspule nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Profilsegmente ineinander verdrehte Einzellitzen (13) eines das Kühlrohr (3) umhüllenden Litzenleiters (12) sind.
3. Direktgekühlte Magnetspule nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Profilsegmente (2) Rechteckstangen mit querschnittlich halbkreisförmigen, das Kühlrohr (3) formschlüssig umschließenden Rinnen (4) sind.
4. Direktgekühlte Magnetspule nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß auf die Außenfläche der Profilsegmente (2, 2') weitere Einzeileiter (5) aufgebracht sind.
5. Direktgekühlte Magnetspule nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß am Kühlrohr (3) die Profilsegmente (2) zumindest teilweise halternd umgreifende Halterungsstege (7, 9, 10) angeformt sind.
6. Direktgekühlte Magnetspule nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß am Kühlrohr (3) um 180° gegeneinander versetzte Längsstege (7) angeformt sind, an denen beabstandete, beidseits überstehende Hakenquerstege (9) angeformt sind.
7. Direktgekühlte Magnetspule nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß am querschnittlich vorzugsweise rechteckförmigen Kühlrohr (3') seitliche, jeweils ein Profilsegment (2') formschlüssig aufnehmende Rohrprofile (11) angeformt sind.
8. Direktgekühlte Magnetspule nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die seitlichen Rohrprofile querschnittlich rechteckförmig sind und eine glatte, rechteckförmige, vorzugsweise quadratische, Außenkontur bilden.
9. Verfahren zur Herstellung eines Leiters für eine direktgekühlte Magnetspule nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Kühlrohr (3') mit seinen angeformten Rohrprofilen (11) durch Extrusionspressen unter gleichzeitiger Einlagerung der Profilsegmente (2') gefertigt wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen



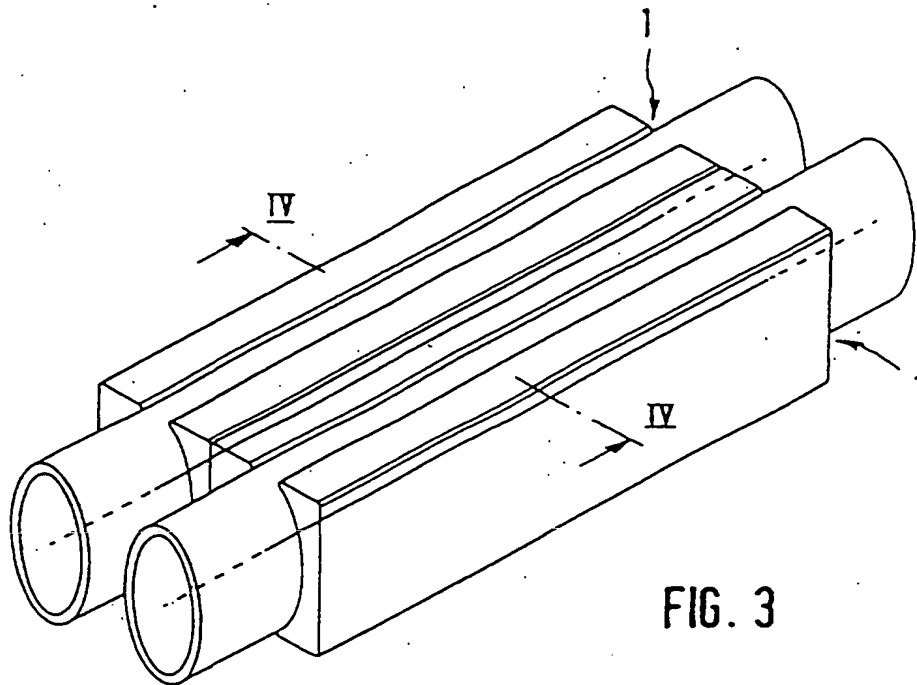


FIG. 3

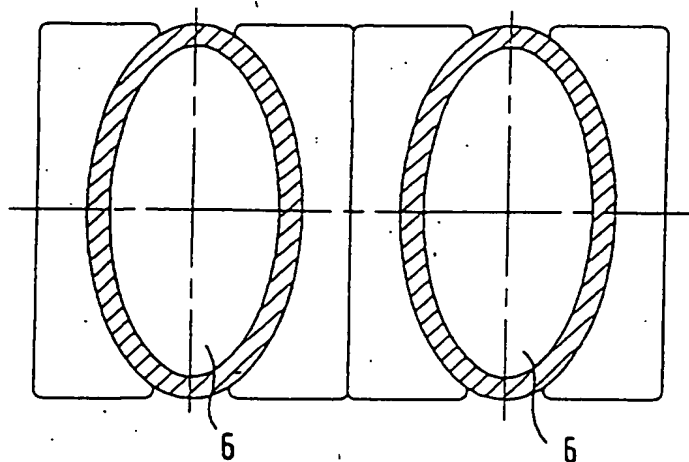


FIG. 4

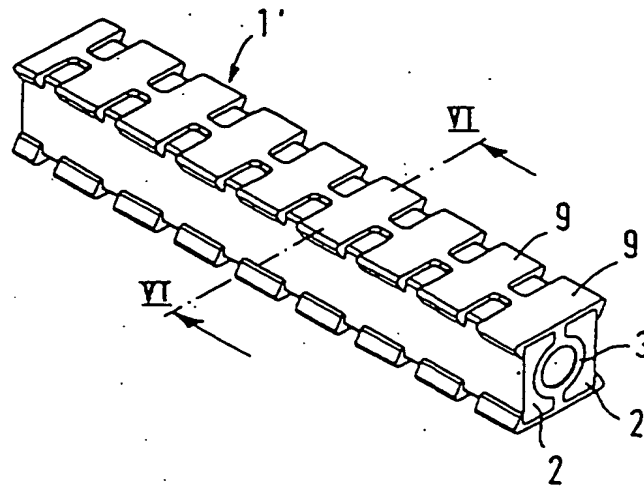


FIG. 5

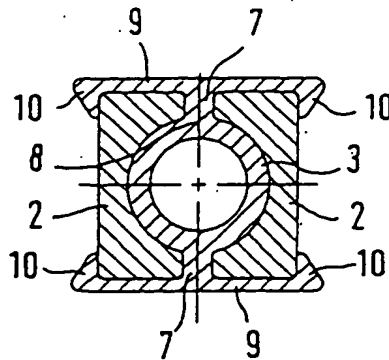
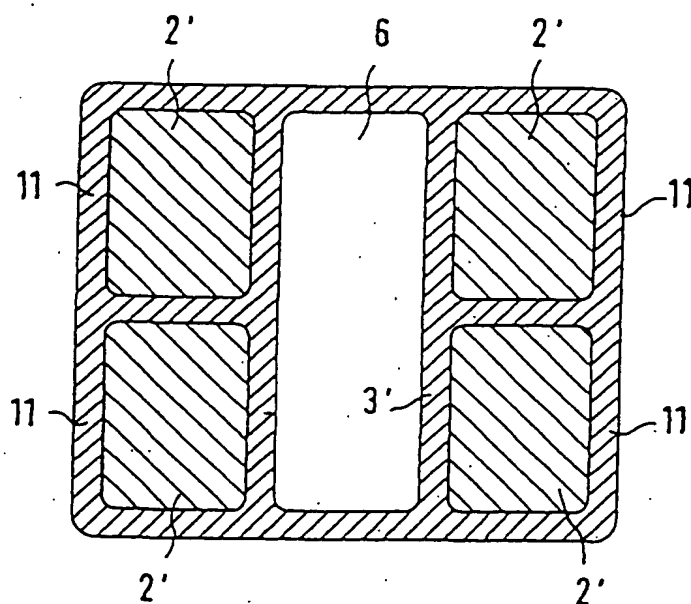
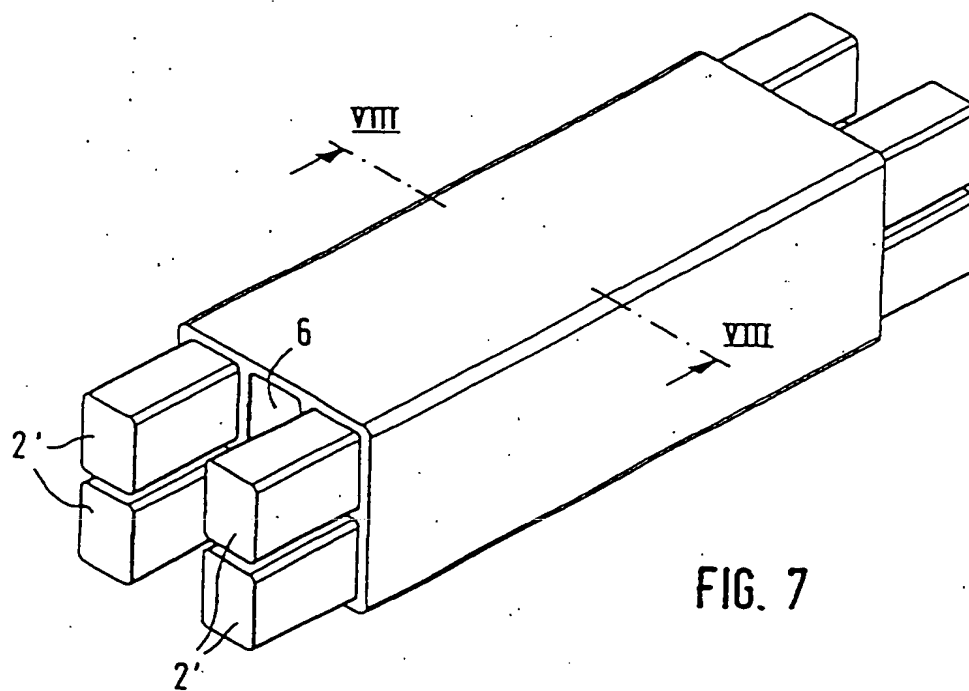


FIG. 6



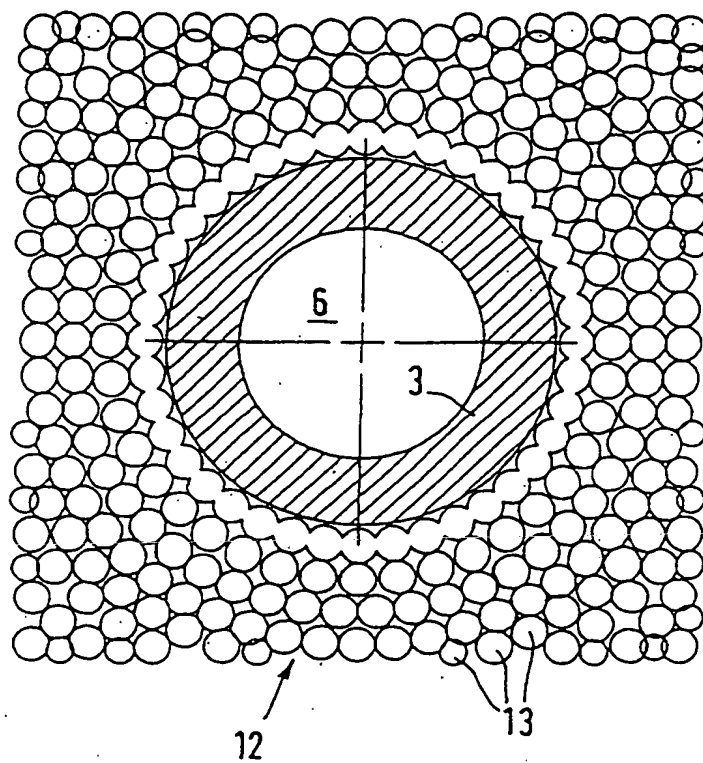


FIG. 9